

A. BURGER

Privat-docent à l'Université de Neuchâtel

ASPECTS ET PERSPECTIVES DE L'HYDROGÉOLOGIE

Extrait des
ANNALES GUÉBHARD
39 année (1963)

Editeur : FONDATION ADRIEN GUÉBHARD-SÉVERINE
Rue de l'Hôpital 16, Neuchâtel (Suisse)

ASPECTS ET PERSPECTIVES DE L'HYDROGÉOLOGIE ¹

par A. Burger

1. LA PLACE DE L'HYDROGÉOLOGIE PARMI LES SCIENCES
DE L'EAU ET DE LA TERRE

L'hydrogéologie est une branche de la géologie orientée vers l'étude des eaux de l'écorce terrestre, principalement des eaux chimiquement libres et susceptibles de se déplacer au sein des roches.

Primitivement, les eaux du sous-sol formaient l'objet principal de l'hydrologie. C'est ainsi que l'auteur allemand E. PRINZ (1923) définit encore l'hydrologie comme la subdivision des sciences de l'eau qui a trait spécialement à l'eau souterraine.

En 1924, l'Union géodésique et géophysique internationale institua une Association d'Hydrologie scientifique, réunissant les spécialistes voués à l'étude des eaux présentes aussi bien dans le sol qu'à sa surface. Au cours d'une réunion tenue à Zurich, en 1938, l'Association subdivisa son champ d'activité en quatre domaines :

- la Potamologie : étude des eaux courantes superficielles,
- la Limnologie : étude des lacs,
- l'Hydrologie : étude des eaux du sous-sol,
- la Cryologie : étude de la neige et de la glace.

La confusion continuait à régner quant aux limites exactes de l'hydrologie. En 1939, O. MEINZER (1942) proposa enfin de désigner la science des eaux souterraines par le terme de géohydrologie, terme qui est devenu aujourd'hui *hydrogéologie*.

De ce fait, la dénomination d'*hydrologie* s'applique maintenant à l'ensemble des disciplines (hydrogéologie comprise) qui étudient les divers aspects du cycle terrestre de l'eau.

L'hydrologie offre, avec la géologie, plusieurs points de contact du fait que l'eau préside à d'importantes manifestations évolutives de l'écorce terrestre (érosion et accumulation) et qu'elle forme en même temps un corps minéral constitutif de cette dernière.

L'hydrogéologie s'adresse à l'eau, élément géologique vivant à l'échelle de l'homme, qui n'a cessé d'exercer depuis vingt millions de siècles et qui exerce aujourd'hui toujours, une action primordiale et visible dans les transformations de la surface de la terre. Le comportement de l'eau souterraine constitue une des préoccupations de cette *géologie dynamique*, issue de la géologie descriptive, qui se propose de découvrir les causes des phénomènes actuels et passés.

La communauté des préoccupations de l'hydrogéologie et de la géologie dynamique est illustrée par l'enchaînement des phénomènes liés à la dissolution du calcaire, dans notre sous-sol jurassien. Si l'on admet qu'un litre d'eau sortant aux sources entraîne avec lui en

¹ Leçon inaugurale du cours d'Hydrogéologie à l'Université de Neuchâtel, décembre 1961.

moyenne 220 mg de carbonate de chaux dissous, chaque kilomètre carré du territoire se voit privé annuellement de quelque 90 m³ de calcaire. Ce processus chimique transforme le calcaire, imperméable de nature, en un milieu extrêmement perméable, au point que le ruissellement normal disparaît complètement de vastes surfaces et qu'apparaît une morphologie caractéristique. En profondeur, se développe un réseau de cavités de toutes dimensions conférant à la masse rocheuse une capacité croissante d'emménagement de l'eau. Du caractère des réservoirs souterrains ainsi créés dépend le régime des sources qui s'en échappent, lequel influence en fin de compte le pouvoir érosif des cours d'eau. Quant au calcaire dissous, il va précipiter et s'accumuler dans les nappes d'eau libre. Le lac de Neuchâtel intercepte annuellement 90 000 tonnes de carbonates précipités qui, sous forme de craie lacustre, contribuent à son comblement à raison de 0,7 mm par an. Les sédiments lacustres, appelés à s'élever progressivement au-dessus des niveaux de base de l'écoulement, deviennent à leur tour le siège de phénomènes hydrogéologiques particuliers, tels que ceux des puissants limons du fond du Val-de-Travers ou du calcaire d'eau douce du Locle.

L'hydrogéologie recrute ses spécialistes autant parmi les ingénieurs que parmi les géologues. Cette particularité découle partiellement de la confusion régnant encore entre hydrologie et hydrogéologie. G. CASTANY (1962, p. XI) le relève justement : « Deux courants philosophiques se dessinent actuellement : la recherche mathématique, à base de mécanique des fluides, adoptée par les hydrauliciens ; la méthode du naturaliste relevant de l'observation et de l'intuition contrôlées par l'expérimentation, appliquée par les géologues. Ainsi, le problème primordial de la circulation des eaux dans le sol et le sous-sol est étudié sous un double aspect : mathématique, relevant des lois et formules de l'hydrodynamique ou naturaliste, par l'observation et l'expérimentation dans les conditions réelles. »

Si la pratique de l'hydrogéologie exige effectivement une connaissance poussée de l'hydrodynamique, elle n'en demeure pas moins une spécialité fondamentalement géologique.

Un exemple illustrant bien les emprunts que l'hydrogéologie opère dans d'autres disciplines est fourni par le problème longtemps discuté des célèbres moulins d'Argostoli, dans l'île grecque de Céphalonie : Sur la côte occidentale de l'île, près de la ville d'Argostoli, il existe, en deux points de la grève rocheuse, des pertes d'eau de mer. Au XIX^e siècle, on a aménagé des canaux, entre la mer et ces orifices d'absorption et installé des moulins animés par le courant d'eau marine ainsi créé. Le débit absorbé par les pertes s'élève à 1,7 m³/s environ, ce qui représente un volume de 150 000 m³ par jour. Où va donc cette eau s'engouffrant ainsi continuellement sous le niveau de la mer ? Géologues, ingénieurs, physiciens, chimistes ont proposé beaucoup d'explications possibles. Constatacion certaine : des considérations uniquement géologiques ne donnent pas la clé du phénomène. Il appartient à un géographe hydraulicien, LEHMANN (1932), d'avoir fourni une explication simple et raisonnable : dans le sous-sol calcaire de l'île existent des canaux naturels qui drainent les eaux d'infiltration et les conduisent à des sources sous-marines. L'un d'entre eux présente une disposition telle qu'il fonctionne comme une trompe à eau, créant, dans une cheminée en relation avec la surface, une dépression piézométrique, grâce à laquelle l'eau de mer peut s'engouffrer. Celle-ci ressort donc au large de la côte, mélangée à l'eau douce provenant de l'île.

L'ingénieur-hydrologue aura parfois tendance à s'imaginer que la géologie ne doit fournir qu'une connaissance descriptive des terrains qui constituent le support de l'eau souterraine. Les seules qualités pétrographiques : granulométrie, porosité, perméabilité des roches, éventuellement les propriétés géotechniques, lui suffisent. En réalité, la géologie apporte beaucoup plus : L'eau, presque partout présente dans le sous-sol, s'y distingue par des modes de gisement fort variés, en rapport étroit avec la nature des roches. La prévision des conditions de gisement (puisque l'eau souterraine échappe à la vision directe) implique donc notamment la prévision géologique du sous-sol

avec toutes les méthodes et les développements que celle-ci comprend. L'interprétation géologique fait appel à de nombreuses particularités dont l'intérêt échappe aux non-initiés. Seul un esprit familiarisé avec les processus évolutifs du globe saura reconstituer une séquence géologique : allées et venues d'une mer, expliquant la disposition et la nature des strates sédimentaires; divagations d'un cours d'eau, d'où résultent la forme et la composition d'une masse alluviale; soulèvements et plissements, qui créent les conditions d'une circulation d'eau du type tectonique, etc. L'interprétation et l'extrapolation des résultats d'un forage, par exemple, exigent une compréhension de la genèse du sous-sol traversé.

A la physique, à la chimie et aux mathématiques, l'hydrogéologie emprunte la connaissance du comportement de l'eau dans les roches.

L'eau du sous-sol est, presque sans exception, animée de mouvements. La dynamique des fluides, au sein des roches, relève en partie d'une loi simple¹. Un nombre considérable d'erreurs d'interprétation est né et naît encore d'une méconnaissance des bases dynamiques de l'écoulement ou d'une confusion entre celles-ci et les phénomènes hydrostatiques.

On rappellera, à ce propos, les divergences qui se sont fait jour dans l'explication des phénomènes hydrogéologiques du calcaire. Pendant longtemps deux écoles s'opposèrent : d'un côté figuraient les partisans d'une circulation souterraine en veines concentrées, en courants libres ou sous pression, en siphons, en nappes d'eau libre, etc. Le spéléologue français E.-A. MARTEL (1921) fut le plus ardent défenseur de cette hydrogéologie subjectivement dynamique. De l'autre côté, se dressaient, avec une argumentation non dépourvue de pertinence, les tenants d'une nappe souterraine plus ou moins immobile dans le calcaire. Sans se rendre compte de la contradiction existant entre le concept hydrostatique et la notion de circulation, le géographe allemand A. GRUND (1910), promoteur d'une théorie qui fit largement école, décrivait au sein de la roche fissurée un plan d'eau, la « surface de l'eau souterraine stagnante ». L'une et l'autre des théories conduisirent à des malentendus. Aujourd'hui, on constate que la plupart des phénomènes hydrogéologiques du calcaire, avec leurs degrés d'évolution divers, obéissent à des lois dynamiques déterminées dans lesquelles certains paramètres varient, notamment le gradient hydraulique.

Une compréhension complète des phénomènes hydrogéologiques requiert aussi la connaissance des propriétés physico-chimiques de ce liquide très spécial qu'est l'eau. En effet, si l'eau représente, dans l'esprit de chacun, le type même du corps à l'état fluide, cela n'est dû qu'à son ubiquité. Du point de vue physique et chimique, l'eau montre plusieurs anomalies qui font d'elle un liquide exceptionnel dans la famille des composés hydrogénés binaires. Comment se présenterait le cycle hydrologique dans les conditions thermiques actuelles du globe, comment se présenterait la surface du globe elle-même si, par exemple, le point de congélation de l'eau était de quelques dizaines de degré inférieur ou supérieur à celui qu'elle possède. On imagine aussi facilement les conséquences qu'entraîneraient une tension de vapeur ou une viscosité plus élevées.

En appliquant des lois physiques et des modes de calcul rigoureusement mathématiques, l'hydrogéologue devra toujours garder présente à l'esprit la distance séparant la nature des conditions de laboratoire. Les systèmes

¹ La loi de Darcy, caractérisant l'écoulement dans les roches finement poreuses telles que les sables et les graviers et selon laquelle la vitesse de l'eau est proportionnelle au gradient hydraulique : $v = ki$, k étant une constante exprimant la perméabilité du milieu aquifère.

hydrauliques souterrains sont fréquemment hétérogènes. Les couches aquifères sableuses et graveleuses offrent, en général, une anisotropie qui rend illusoire une application rigoureuse des formules de débit, par exemple ¹. La disposition, la pente et la perméabilité des alternances sableuses et graveleuses varient. Un puits placé dans une formation alluviale peut recevoir son afflux d'eau principal d'un étroit niveau seulement. La détermination du coefficient de perméabilité revêt une imprécision notoire. A. MAYER (1947) écrit à ce propos : « Nous avons vu des ingénieurs surpris en nous entendant dire, de deux sables, qu'ils avaient même perméabilité alors que les mesures donnaient des résultats variant de 20 % ».

Cependant, la connaissance approfondie des lois théoriques de l'écoulement souterrain s'avère indispensable pour saisir dans leur essence les manifestations de l'eau souterraine. Elle permet de comparer à des conditions idéales des résultats d'observation et de prévoir des ordres de grandeur de débits ou de réserves. L'observation des phénomènes naturels conduit à fixer les limites d'application des lois physiques et ces dernières mettent en lumière les limites de la nature. Dans ses fréquents passages de la théorie à la pratique et de la pratique à la théorie, l'hydrogéologue ne devra jamais se départir d'un état d'esprit critique à l'égard de toute conclusion.

L'hydrogéologue est un peu pareil au médecin qui pose un diagnostic. Ses conclusions offrent d'autant plus de valeur qu'elles procèdent d'une expérience plus vaste et qu'elles ont triomphé des objections élevées par un esprit toujours critique. Léonard de Vinci avait déjà médité sur cette condition quand il écrivait : « Souviens-toi, lorsque tu traites des eaux, d'alléguer d'abord l'expérience et ensuite le raisonnement. »

Ce trait commun à l'hydrogéologue et au médecin, cette réserve dans les jugements, explique les succès de leur concurrent de toujours : le radiésthésiste. Depuis plus de dix ans que nous travaillons au service des communes neuchâteloises, nous avons assisté à bien des travaux entrepris sur les indications de sourciers et autres pendulissants. Tous, sans exception, se sont trompés. L'échec ne porte d'ailleurs aucune atteinte à leur prestige tant l'homme subit encore l'ascendant des pratiques mystérieuses. Au surplus, le radiésthésiste décèle *partout* au moins un point de recherche favorable et prédit le succès avec assurance. Il va ainsi au-devant du désir de son interlocuteur, qui est beaucoup plus ébranlé par des affirmations sans réplique que par les considérations nuancées et réservées du géologue.

Lorsqu'il s'adresse non plus au terrain aquifère, mais à l'eau elle-même, considérée dans le contexte du cycle hydrologique général, l'hydrogéologue se trouve appelé à rechercher certaines lois naturelles. Comme l'a relevé justement J. LUGEON (1928), les phénomènes hydrologiques résultent d'un nombre important de facteurs variables, dont aucun n'est totalement indépendant des autres. Cela complique beaucoup l'interprétation mathématique des résultats d'observation. La recherche d'une loi générale à partir des faits observés, se fera par la méthode statistique. L'établissement de *corrélations* permet de dégager des règles générales de la plus grande importance ou, au contraire, de réfuter des opinions subjectives. Il suffit simplement de rester

¹ La formule de débit classique de Dupuit n'implique pas moins de sept hypothèses simplificatrices (CASTANY, 1962).

toujours conscient du degré d'exactitude des observations ainsi que de l'importance et de la signification des écarts qui affectent certains points d'une corrélation, même satisfaisante.

L'exemple suivant illustrera la manière dont l'étude statistique et la physique peuvent concourir à préciser, sinon résoudre exactement, une question fort importante dans la pratique: Quel débit une source donnée conservera-t-elle au cours d'une sécheresse prolongée, d'une sécheresse telle qu'il s'en produit tous les 10 ans ou tous les 50 ans? Ce critère est souvent déterminant dans la décision d'utiliser ou non la source pour une alimentation en eau potable. Les frais de captage et d'adduction doivent rester proportionnés à la quantité d'eau disponible en période critique. Or, il est rarement possible d'attendre pendant des années les conditions exceptionnelles qui fourniraient avec certitude le renseignement.

De nombreuses études ont établi qu'en régime non influencé par les précipitations atmosphériques ou la fonte des neiges, le débit d'une source obéit approximativement à une loi de décroissance exponentielle, exprimée sous la forme suivante:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\beta t}$$

Q_0 étant un débit connu, choisi comme valeur de départ, Q_t , le débit après un intervalle de temps t , et β , un exposant qui dépend des caractères de la formation aquifère dont jaillit la source.

L'application de cette loi peut fournir une réponse satisfaisante à la question posée plus haut.

La rapidité de la décroissance s'exprime dans la valeur de β . Pour préciser les limites entre lesquelles peut varier cette valeur nous avons utilisé une série de mesures faites au cours d'une période sèche, sur une vingtaine de sources provenant de terrains morainiques de la région neuchâteloise. En choisissant le jour comme unité de temps, les valeurs caractéristiques de β sont:

$$0,042 > \beta > 0,009 \text{ et } \beta \text{ moyen} = 0,022$$

Les courbes de tarissement correspondant à chacune des valeurs ci-dessus sont dessinées à la figure 1. Elles illustrent le fait que nos sources présentent des vitesses de décroissances fort différentes les unes des autres. Il n'y a rien de surprenant à cela, si l'on songe à la diversité de nature et de situation des terrains qui se rangent sous la dénomination de dépôts glaciaires.

Pour une courbe donnée, les débits, à intervalles réguliers $t_1, t_2, \dots, t_n$, sont liés entre eux par la relation:

$$\frac{Q_{t_1}}{Q_{t_0}} = \frac{Q_{t_2}}{Q_{t_1}} = \dots = \frac{Q_{t_n}}{Q_{t_{n-1}}}$$

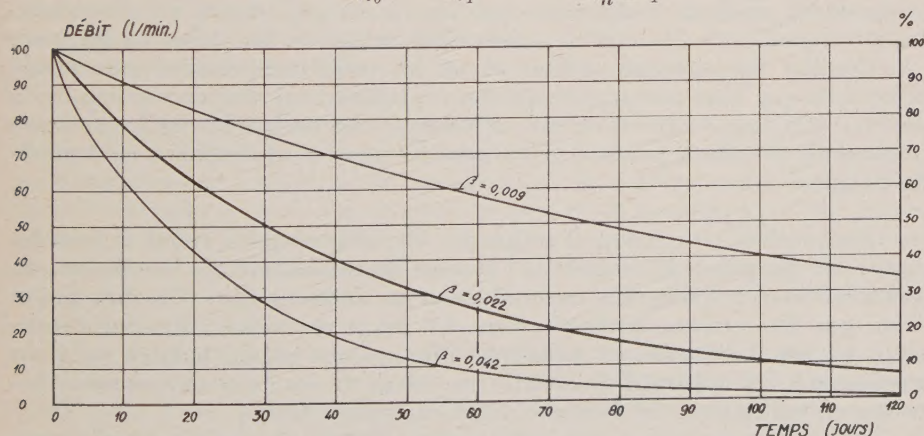


Fig. 1. Courbes de tarissement de sources issues de terrains morainiques.

Le diagramme de la figure 1 peut servir d'abaque, valable quel que soit le débit initial considéré. Il suffit d'attribuer à celui-ci la valeur de 100 et de calculer alors les débits successifs à partir de leurs valeurs données en pour-cents par les courbes.

Si l'on ne possède qu'une seule mesure de débit, on tentera de choisir un ordre de grandeur de β en s'inspirant de considérations géologiques locales. Si, en revanche, on dispose de deux, ou mieux, de trois mesures successives, faites durant une même période non influencée, il sera possible de construire graphiquement, à l'aide de l'abaque, une courbe de tarissement offrant un degré d'exactitude satisfaisant pour les besoins de la pratique.

2. DOMAINES D'APPLICATION DE L'HYDROGÉOLOGIE

L'étude des eaux du sous-sol contribue à la connaissance générale de la terre. Elle peut éclairer la genèse et l'histoire de formations anciennes et elle fournit l'explication de nombreuses manifestations de l'évolution morphologique.

Toutefois, notre propos, ici, n'est pas de développer la portée scientifique de l'hydrogéologie, mais de montrer dans quelle mesure considérable elle accompagne aujourd'hui le développement de la civilisation.

Car l'hydrogéologie demeure avant tout une science appliquée qui est née d'un besoin précis, celui de mettre à disposition de l'homme, de l'eau saine. L'homme, appelé à tirer ses moyens de subsistance de la terre, s'est aperçu très tôt que le sous-sol recèle de l'eau, même dans les régions désertiques. Empiriquement, il donna toujours sa préférence aux sources et à l'eau souterraine. La recherche de l'eau cachée a fait l'objet de travaux considérables dans l'Antiquité déjà, de nombreux vestiges en témoignent encore aujourd'hui. Très tôt aussi, des explications de la présence de l'eau dans les roches ont été tentées, qui nous surprennent par leur caractère obscur et tortueux. C'est que, comme le dit justement F. REVOL (1948), « on ne pense pas toujours au terrain rocailleux semé d'obstacles, à travers lequel l'esprit humain dut se frayer un chemin » pour parvenir à des découvertes qui, aujourd'hui, apparaissent étonnamment simples. Ainsi, par exemple, il faut attendre un esprit critique comme Bernard de Palissy pour comprendre que les sources sont engendrées tout bonnement par la pluie.

Héritière de l'art admirable des puisatiers, l'hydrogéologie moderne ne commence à sortir de l'empirisme que dans la seconde moitié du XIX^e siècle. La mise en valeur des régions semi-arides et arides du globe, où les eaux superficielles font presque défaut et où les eaux souterraines sont moins accessibles que dans nos pays tempérés, contribue à lui donner une impulsion décisive. On rappellera ici, à titre d'exemple, les recherches et les travaux remarquables réalisés par la France dans les pays nord-africains, en bordure du Sahara.

Aujourd'hui, le champ d'action de l'hydrogéologie s'étend à tous les pays sans exception. En raison de l'énorme accroissement des besoins en eau saine, les sources jaillissant naturellement ne suffisent plus. On doit puiser l'eau, par des moyens artificiels, dans les réservoirs souterrains que constituent les couches rocheuses aquifères. Plus aucune région habitée du globe n'échappe à cet impératif de la mise en valeur de ses eaux souterraines. Les études se multiplient, le domaine des recherches s'élargit.

L'eau se prête mal au transport sur de longues distances, comparative-ment à l'électricité ou même au gaz. Aussi doit-elle être trouvée près des

lieux d'utilisation. A défaut, ce sont les consommateurs eux-mêmes qui se rapprochent des sources d'approvisionnement.

Les besoins vitaux de l'homme en eau, relativement modestes, sont de plus en plus dépassés par les exigences énormes des raffinements du confort, de l'industrie et de l'agriculture. Dans un territoire en pleine expansion, tel que l'Etat d'Israël, par exemple, les chiffres à cet égard sont suggestifs : En 1967, les besoins domestiques et industriels s'élèveront à 300 millions de m³ par an, soit à 100 m³ par habitant. Les territoires irrigués qui, à l'origine de l'Etat d'Israël atteignaient 240 km², comprennent actuellement déjà 1250 km², exigeant 1000 millions de m³ d'eau. En 1967, la demande de l'irrigation aura passé à 1500 millions de m³, lesquels, ajoutés à la consommation domestique et industrielle, impliquent l'utilisation de la *totalité des disponibilités reconnues*. Simultanément avec la recherche et la mise en valeur de toutes les ressources naturelles possibles, des études approfondies se poursuivent sur l'utilisation de l'eau de mer, la lutte contre l'évaporation, l'étanchement des réservoirs, la récupération partielle des eaux utilisées par la population, etc. (ZDILAR, 1962).

Des chiffres non moins impressionnants caractérisent l'économie de l'eau en bien d'autres pays et signifient clairement qu'aujourd'hui, on ne doit plus compter sur l'eau, mais *avec* l'eau.

Récemment, un membre éminent de la Commission internationale des irrigations et du drainage a déclaré que le 20^e siècle sera appelé le « siècle de l'irrigation » (SULEIMAN, 1957). La mise en valeur des terres arides par arrosage artificiel se développe actuellement à une cadence parabolique. Au début du siècle, les surfaces irriguées, dans le monde, totalisaient 400.000 km². En 1957, ces surfaces avaient triplé et on estime qu'elles atteindront 2 millions de km² en l'an 2000. Une telle perspective présume un aménagement des eaux souterraines à une échelle dont il n'existe encore que peu d'exemples.

Si la mise à disposition de l'eau représente la tâche essentielle de l'hydrogéologie, d'autres problèmes cependant requièrent aussi sa contribution.

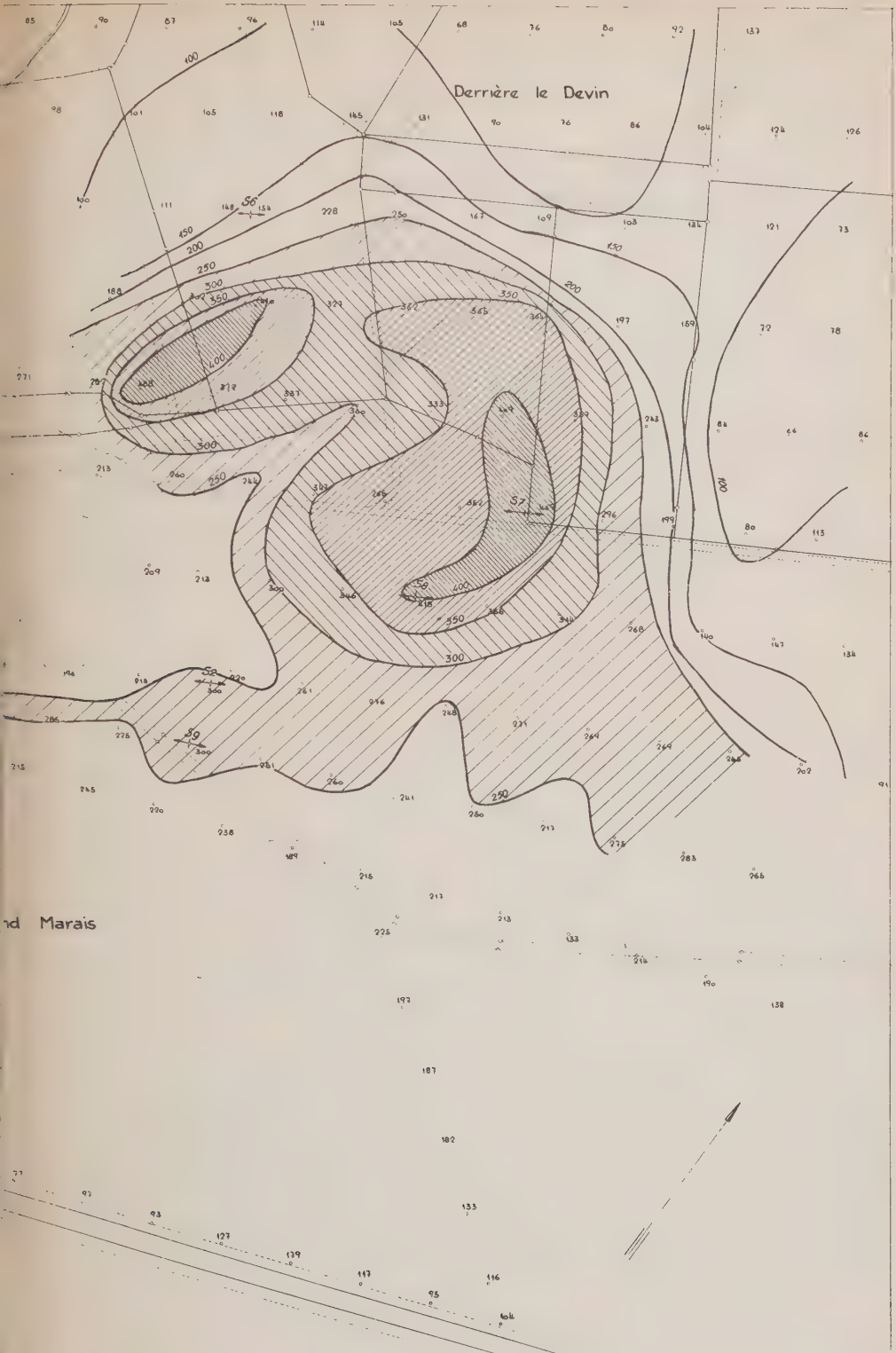
Les qualités mécaniques des terrains, qui forment l'objet de la *géotechnique*, dépendent, en grande partie, de l'eau d'imbibition. Les recours aux méthodes scientifiques de la géotechnique deviennent de plus en plus fréquents pour la détermination de la résistance des sols aux charges et pour l'assainissement et la stabilisation des terrains mouvants.

La création des lacs artificiels sollicite largement aussi les lumières de l'hydrogéologie. L'étanchéité de la retenue ainsi que de la zone d'implantation du barrage conditionnent la possibilité de l'ouvrage. Pour l'hydrogéologue, le problème consiste à supputer les modifications du régime souterrain qu'entraînera le relèvement local d'un niveau de base d'écoulement. La tâche s'avère particulièrement délicate dans les régions calcaires, les terrains fortement tectonisés ou les formations alluviales. L'hydrogéologue est appelé ainsi à trancher une des plus lourdes incertitudes qui pèse sur des investissements considérables de capitaux.

En développant la technique de l'étanchement des sites de barrages, par injection de ciment ou de boue, on en est venu à l'idée de créer des barrages *souterrains*. Les fonds de vallées occupés par des alluvions perméables canalisent fréquemment un courant d'eau phréatique coulant vers l'aval. En réalisant artificiellement, par injection des alluvions, un noyau imperméable



Fig. 5. Carte des résistivités électriques du sous-sol, à l'Est du village de Lignières, obtenues avec une ligne d'émission de 24 m de longueur. Emplacement des sondages électriques.



en un endroit approprié, on parvient à régulariser le débit du courant et à constituer, en amont, une accumulation souterraine d'eau. Dans les régions arides, où les circulations souterraines tiennent une place prépondérante, ce procédé permet d'entrevoir des aménagements particulièrement intéressants. L'eau accumulée en sous-sol se trouve naturellement peu exposée à l'évaporation.

La pollution des eaux souterraines, du fait de son caractère tenace, parfois même irréversible, soulève des problèmes de plus en plus nombreux et de plus en plus graves aussi. Les phénomènes qui s'y rapportent requièrent une connaissance approfondie du chimisme délicat des eaux du sous-sol. Les contaminations biologiques et chimiques les plus fréquentes proviennent des infiltrations de rivières ayant une charge en matières organiques trop élevée et de dépôts d'ordures ou de déchets industriels. Actuellement, une nouvelle menace surgit de la part des conduites et des réservoirs d'huile minérale enterrés. Avec le développement du chauffage au mazout, les citernes métalliques, enfouies dans le sol, se multiplient. Une récente enquête, effectuée dans le canton de Berne, a révélé qu'actuellement déjà le 61 % de ces réservoirs présente des corrosions importantes. Et que penser de l'oléoduc qui traversera la nappe alluviale de la plaine du Rhin suisse, lorsqu'on apprend que l'on tolère des fuites de 3 pour mille de la quantité de liquide transporté, par 100 km de longueur ? En raison de l'extrême sensibilité de l'eau aux goûts donnés par les hydrocarbures, de faibles quantités de mazout répandues dans le sol peuvent rendre un captage inutilisable pour très longtemps.

3. L'INVESTIGATION HYDROGÉOLOGIQUE

Dans les couches superficielles de l'écorce terrestre, l'eau (chimiquement libre) existe partout. S'il s'agit d'extraire cette eau au moyen d'ouvrages artificiels, l'hydrogéologue s'appliquera à rechercher, au sein de l'enveloppe humide générale de la terre, certains cas particuliers.

L'eau ne peut être tirée économiquement que des terrains dans lesquels elle se trouve à l'état *gravifique*, c'est-à-dire où elle se déplace sous l'effet de la pesanteur (par opposition avec l'eau capillaire, par exemple). De plus, elle n'offrira la constance désirée que dans les masses rocheuses dont la porosité reste normalement toujours saturée. Ces conditions impliquent la localisation des couches à perméabilités limites : d'une part, les formations à très faible perméabilité qui jouent le rôle d'enveloppes étanches et, d'autre part, les gisements à perméabilité élevée, placés dans des conditions telles qu'ils fonctionnent comme pièges à eau gravifique.

Entre les deux extrêmes, il existe naturellement tous les types intermédiaires de roches dont la structure n'autorise que des circulations lentes, impropres à fournir un afflux d'eau important vers un point de captage. Ces terrains non exploitables, constituant la majeure partie des masses aquifères du sous-sol, remplissent toutefois un rôle capital en libérant lentement leur contenu au profit des formations très perméables, qui font office de drains naturels. Ils contiennent les réserves, souvent considérables, qui garantissent la pérennité des sources et des rivières. Les faibles vitesses d'écoulement dont ils sont le siège assurent, en outre, une bonne filtration de l'eau.

La réalisation d'un captage d'eau souterraine obéit à deux conditions qui se trouvent parfois en contradiction partielle : d'une part, l'ouvrage doit être disposé de manière à soutirer le plus d'eau possible de la formation aquifère, d'autre part, le régime de puisage ne doit pas excéder les ressources naturelles de la formation.

Autrefois, la méconnaissance des systèmes hydrauliques souterrains, ainsi que l'insuffisance des moyens techniques, conduisaient fréquemment à des captages mal placés ou incomplets. On s'en rend compte maintenant par le nombre des ouvrages qui sont à refaire, à déplacer ou à approfondir. Les mêmes causes expliquent aussi l'insuccès de nombreuses recherches entreprises dans des conditions qui surprennent aujourd'hui.

De nos jours, l'hydrogéologue est en mesure de désigner un point de captage offrant des conditions optimums de débit et de qualité de l'eau. Les moyens d'investigation dont il dispose, alliés à son expérience personnelle, lui permettent d'accomplir un travail préparatoire qui confère à ses prévisions, favorables ou défavorables, une probabilité d'exactitude de 90 % ou même davantage.

La perfection même d'un ouvrage de captage comporte un danger : celui d'une exploitation exagérée de la formation aquifère. Le régime de puisage doit être adapté aux ressources naturelles. Si, pour compenser les fluctuations saisonnières des besoins ou du débit naturel, on épuise partiellement le réservoir souterrain, il convient de veiller à ne pas excéder la capacité de reconstitution de celui-ci au cours du cycle annuel.

Un cas particulièrement frappant d'épuisement progressif d'une formation aquifère, causé par des prélèvements excessifs, ressort des observations faites depuis 1930, dans le Nord de la France. La figure 2 souligne l'abaissement de plus de 35 mètres du niveau piézométrique qui s'est produit dans la nappe du calcaire carbonifère, à Roubaix, de 1945 à 1960 (LEROUX..., 1962). Pour remédier à cette situation et répondre à la demande d'eau croissante, la solution a été envisagée d'approfondir les puits dans l'épaisse série calcaire. Mais, sans parler des frais considérables qui en résulteraient, rien ne permet d'assurer que l'opération serait efficace, notamment en raison du fait que la perméabilité de la roche décroît en profondeur. Dans l'état

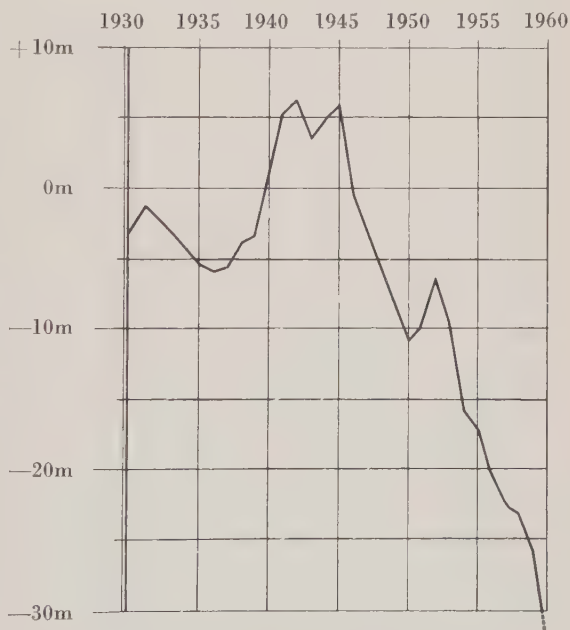


Fig. 2. Variations du niveau piézométrique de la nappe du calcaire Carbonifère au forage Hannart-Motte et Marquette, à Roubaix (d'après LEROUX, 1962).

actuel des connaissances, le seul moyen de compenser la surexploitation consisterait à réalimenter artificiellement la nappe à l'aide d'ouvrages appropriés d'infiltration d'eau de rivière.

L'investigation hydrogéologique consiste d'abord en une quête minutieuse de tous les éléments d'observation relatifs à la géologie et à l'eau, à l'eau superficielle autant qu'à l'eau du sous-sol. Aucun indice susceptible d'apporter directement ou indirectement un éclaircissement ne doit être négligé.

On commencera donc par établir un canevas géologique dans lequel viendront figurer toutes les manifestations hydrologiques : sources, puits, étangs, marécages, terrains secs ou humides, végétation phréatophyte, pertes d'eau, drainages, etc. On suivra ensuite, dans le temps, l'évolution du débit, du niveau, de la température et de la minéralisation de l'eau partout où elle apparaît. Toutes ces données tendront à supputer l'existence et l'importance d'un réservoir ou d'un courant d'eau souterrain. Dans nos régions tempérées, où les éléments d'observation sont relativement nombreux, cette première phase de l'étude fournira déjà des présomptions sérieuses.

L'existence d'un système aquifère étant établie, la prospection géophysique permettra de le localiser exactement. Parmi les différentes méthodes utilisables, le procédé électrique répond particulièrement bien aux besoins de l'hydrogéologie. Il consiste à mesurer la résistance électrique du sous-sol, à partir de la surface, au moyen d'un dispositif approprié. Il est ainsi possible de différencier électriquement des couches successives, présentant une résistivité propre, laquelle correspond à une nature pétrographique déterminée. Les formations argileuses imperméables, par exemple, se distinguent nettement, grâce à leur faible résistivité, des graviers perméables ou des calcaires, beaucoup moins conducteurs. Les changements pétrographiques se décèlent aussi bien dans le sens horizontal que dans le sens vertical, de telle sorte que les masses aquifères peuvent être entièrement délimitées. Les caractéristiques électriques fournissent également des renseignements sur la perméabilité du terrain. Ces données géophysiques permettront finalement de fixer avec sécurité les points de captage les plus favorables.

L'application de la géophysique aux problèmes d'eau souterraine ne s'est généralisée que récemment. Beaucoup de géologues ont cru pouvoir s'en passer, faute, peut-être, d'en avoir connu suffisamment les possibilités et les limites. Mais la géophysique ne se substitue pas à l'observation et au raisonnement, comme la baguette de coudrier ou le pendule. Elle implique, au contraire, une *interprétation* attentive à tous les éléments d'observation directe et exigeant une expérience géologique étendue. Elle permet de limiter les options.

La phase finale de l'investigation comprend les essais de débit et l'étude de la qualité de l'eau. Ces recherches décisives nécessitent généralement l'exécution de forages destinés à des pompages expérimentaux. Il convient de déterminer, d'une part, la capacité de captage propre du futur ouvrage, qui dépend essentiellement de la perméabilité environnante et, d'autre part, les ressources globales de la formation aquifère. Celles-ci, appelées à dicter le régime d'exploitation durable, seront d'autant mieux connues que le pompage expérimental aura été plus long.

La nécessité impérieuse d'accroître les disponibilités en eau contraint l'hydrogéologie à élargir sans cesse ses horizons. Les problèmes débordent

maintenant le cadre initial des terrains meubles superficiels : alluvions, arènes, dépôts glaciaires, qui forment souvent des gisements bien localisés, d'une étude et d'une mise en valeur relativement faciles. L'échelle des investigations s'agrandit dès le moment où l'on se propose de faire appel à l'eau des socles rocheux. Ceux-ci peuvent abriter des systèmes hydrauliques très étendus et caractérisés par des circulations lentes et profondes. La lenteur des réponses aux manifestations atmosphériques, qui en découle, exige des études étendues dans l'espace et dans le temps, une mise en exploitation prudente, progressive et une surveillance permanente. L'investigation hydrogéologique se doublera notamment de recherches hydrologiques portant sur le régime général des eaux, surtout sous les climats à pluviosité faible ou irrégulière.

Le document qui résume les connaissances sur les eaux souterraines d'une région est la *carte hydrogéologique*. Suivant le but recherché, le nombre ou la précision des données, l'échelle de la carte sera très diverse. La seule représentation des terrains aquifères ne constituerait, en somme, qu'une répétition de la carte géologique. Il convient donc d'aller au-delà et de porter surtout des indications relatives à l'eau elle-même : sa profondeur, sa puissance, son débit, ses variations, son chimisme, etc... La figuration de tous les éléments hydrogéologiques peut soulever beaucoup de difficultés, en raison de la diversité des conditions régionales. Le cas se présente notamment lorsqu'il existe plusieurs formations aquifères superposées. Un effort particulier est accompli actuellement, à l'échelle internationale, en vue de parvenir à un certain degré de normalisation des méthodes d'élaboration des cartes (Unesco, 1963). Cette recherche d'uniformité place l'hydrogéologue actuel dans une situation comparable à celle des géologues d'il y a un siècle et plus.

4. PRÉSENTATION DE QUELQUES DOCUMENTS D'INVESTIGATION HYDROGÉOLOGIQUE

La nature des documents hydrogéologiques varie beaucoup selon les particularités du problème à étudier. Les quelques exemples qui suivent se rapportent à une recherche de caractère local effectuée au plateau de Lignières, canton de Neuchâtel en Suisse, dans des terrains de couverture quaternaire.

Le synclinal de Lignières, succédant à la première chaîne jurassienne, au Nord du lac de Bienne, comporte un remblayage de terrains quaternaires, lui conférant le caractère d'un plateau de deux kilomètres de largeur en moyenne, à l'altitude de 800 m. Cette couverture quaternaire consiste en moraine argileuse peu perméable, en limons remplissant d'anciens étangs et en tourbe. Il se peut, en outre, que les bords de la plaine portent des cordons de graviers périglaciaires. La morphologie laisse deviner encore deux cônes de déjections fluvio-glaciaires, l'un à la sortie d'un vallon longitudinal venant de l'Est et l'autre à l'issue d'un ravin descendant du Nord (fig. 3).

La première carte topographique fédérale au 1 : 25 000, datant de 1879, désigne l'ensemble du plateau comme un marécage, parcouru par des fossés et des ruisseaux (fig. 3). Aujourd'hui, un réseau de drainages artificiels permet la mise en culture de presque toute la plaine.

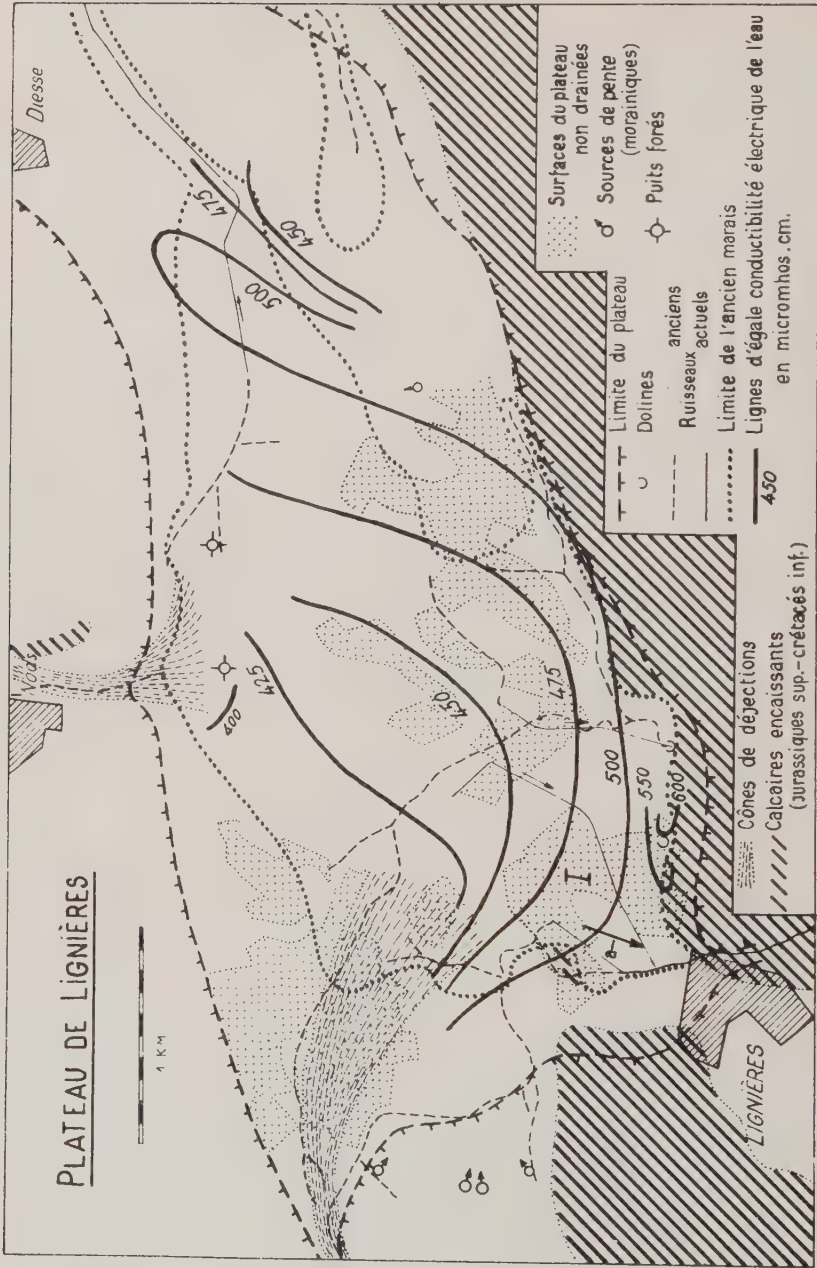


Fig. 3. Esquisse hydrogéologique des terrains quaternaires du plateau de Lignières.

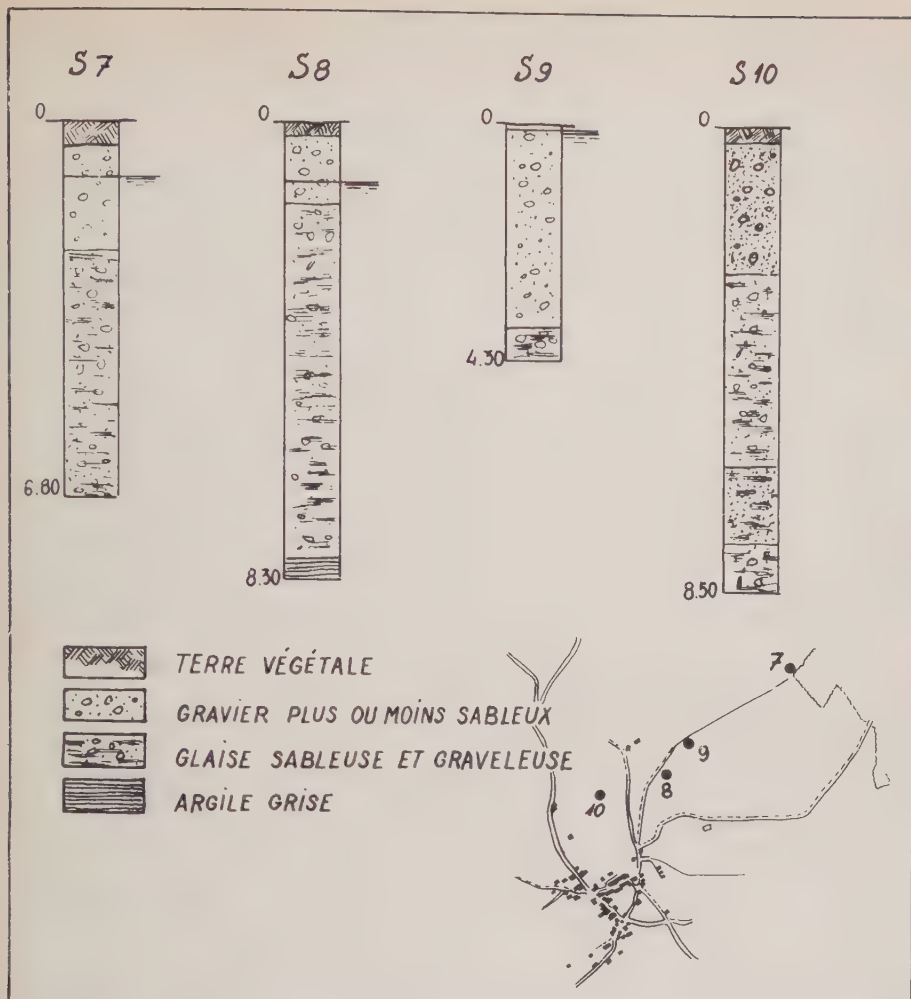


Fig. 4. Profils de sondages à Lignières.

A plusieurs reprises, la température et la conductibilité électrique¹ de l'eau des drainages ont été mesurées. A la profondeur normale de 1 à 1,5 m, les drains se trouvent dans la zone d'hétérothermie du sol, aussi la température de l'eau présente-t-elle de fortes variations saisonnières. En revanche, la conductibilité électrique se montre beaucoup moins influençable et met en évidence des différences significatives. Relativement basse dans les terrains

¹ La conductibilité électrique de l'eau reflète assez fidèlement sa teneur totale en sels dissous. Elle s'exprime en micromhos, à 20° C. le mho étant l'inverse de l'ohm; 1 micromho = 10^{-6} ohm⁻¹ cm⁻¹.

où l'eau circule facilement, elle s'élève fortement lorsque la perméabilité diminue. Les courbes d'égale conductibilité de la figure 3, résultant des mesures effectuées le 29.11.51, permettent de supposer l'existence d'un afflux d'eau souterrain dans le marais, à partir de la bordure septentrionale et notamment depuis les cônes de déjections.

La carte des drainages met en évidence l'existence de quelques aires qui n'ont pas nécessité d'assainissement (fig. 3). La raison en est, vraisemblablement, que le sous-sol y présente une perméabilité suffisante pour l'évacuation rapide des eaux pluviales et souterraines dans les drains environnants.

Le problème à résoudre consistait à trouver un appoint d'eau pour l'alimentation du village de Lignières. Parmi les aires non drainées, l'une d'entre elles, à l'Est de la localité, retint particulièrement l'attention (fig. 3, I). Deux indications conduisaient à supposer qu'elle dénote l'existence d'un noyau de graviers perméables et probablement aquifères : d'une part, une ancienne exploitation de gravier, de 3 m de profondeur environ, au fond de laquelle affleure la nappe phréatique et, d'autre part, le relevé sommaire de quatre sondages effectués autrefois aux abords du village, qui mentionne l'existence de graviers superficiels (fig. 4). Au surplus, l'observation attentive des drainages a révélé que l'un des collecteurs, venant précisément des parages de la gravière, conserve un débit important, de l'ordre d'une cinquantaine de litres par minute (fig. 3, a). Ce fait indique que l'ouvrage reçoit son afflux d'eau principal d'une nappe phréatique stable plutôt que d'une imbibition superficielle et temporaire du sol. La température relativement peu variable de l'eau vient encore appuyer cette hypothèse.

Ces observations de surface tendent à démontrer l'existence d'une masse de terrain aquifère, offrant des présomptions favorables de captage. Aussi, une prospection électrique a-t-elle été décidée. Les résultats en sont résumés par la figure 5 (p. 8-9) qui donne les courbes d'égale résistivité électrique d'une tranche de terrain de l'ordre de 6 m d'épaisseur (ligne d'émission A — B = 24 m). Les graviers résistants, donc perméables, forment un noyau bien délimité, encaissé de toutes parts dans des terrains moins perméables. Leur épaisseur atteint 5 à 6 m, ainsi qu'il ressort de l'interprétation des sondages électriques (fig. 6, S₇).

Le réservoir aquifère est ainsi localisé. On peut tenir pour certain qu'un forage opéré dans le noyau perméable sera positif. La seule incertitude qui subsiste encore concerne le débit. En raison de la faible puissance de la couche aquifère, un puits ordinaire risque d'être insuffisamment productif pour les besoins de la commune; dans ce cas, un autre type de captage entrera en considération. Quant aux ressources globales de la formation, qui dicteront le régime d'exploitation durable, elles dépendent de l'afflux d'eau que les terrains à perméabilité réduite, environnant le noyau de gravier, sont en état de fournir à celui-ci. A cet égard, l'apport présumé depuis la bordure septentrionale du plateau peut exercer une influence positive. Il manque à l'investigation un document important que, faute de moyens financiers, il n'a pas été possible d'établir : la carte des courbes de niveau de la surface de la nappe souterraine. Les données nécessaires à son élaboration s'obtiennent par la mesure des niveaux dans des piézomètres, consistant en tubes métalliques perforés, enfoncés dans le terrain aquifère. L'absence de ces points d'observation représente une lacune notoire, tant pour les recherches préliminaires que pour le contrôle de la nappe en régime d'exploitation.

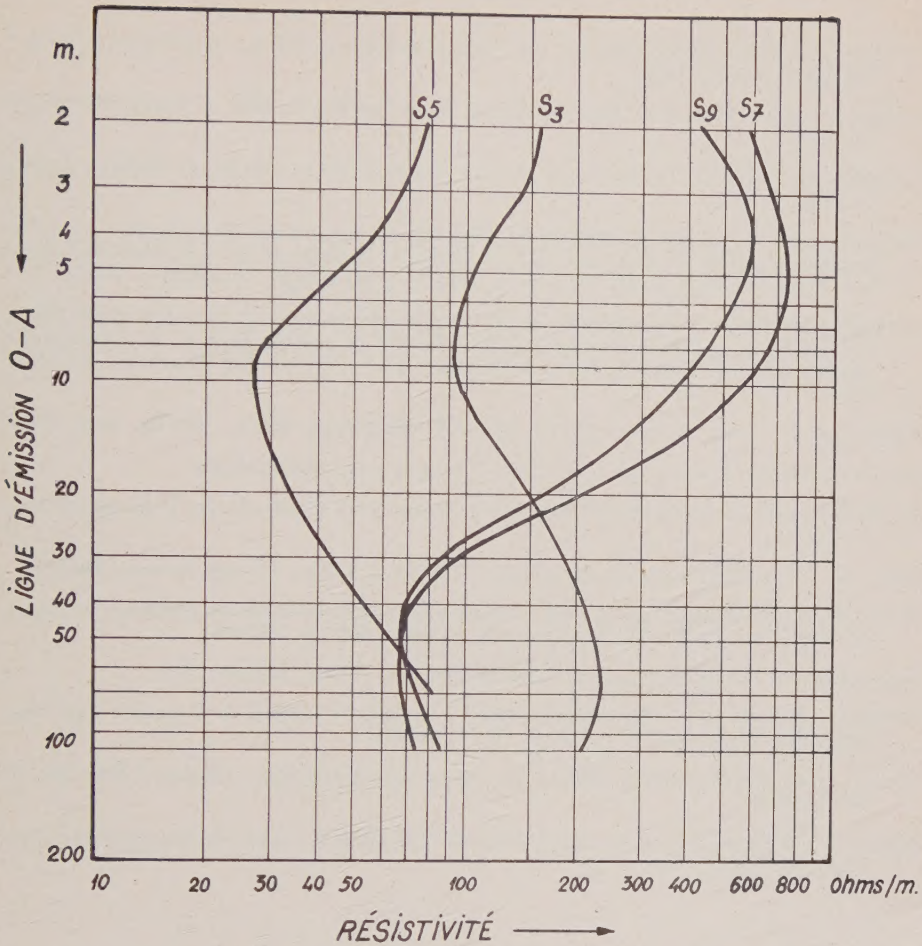


Fig. 6. Sondages électriques. Ils font apparaître trois types de terrains superposés :

- a) des graviers résistants, en surface, aux sondages 7 et 9;
 - b) des terrains argileux conducteurs, de faible puissance aux sondages 3 et 5, sensiblement plus épais aux sondages 7 et 9;
 - c) le calcaire encaissant, résistant, qui apparaît dans les quatre sondages à des profondeurs différentes.
- La position des sondages est donnée à la figure 5 (p. 9-10).

OUVRAGES CITÉS

- CASTANY, G. (1962). *Traité pratique des eaux souterraines*. 657 p., nombreuses figures et tableaux. Dunod, Paris.
- GRUND, ALFRED (1910). *Zur Frage des Grundwassers im Karst*. Mitt. d. Georg. Ges. Wien, Bd. 53.
- LEHMANN, OTTO (1932). *Die Hydrographie des Karstes*. 212 p., 78 fig. F. Deutike, Leipzig et Vienne.
- LEROUX, E., RICOUR, J. et WATERLOT, G. (1962). Mise au point sur les ressources en eau de la région du Nord de la France. Dans : *Méthodes d'études et de recherches des nappes aquifères*, I, p. 105 à 128. Bureau de recherches géologiques et minières, Paris.
- LUGEON, JEAN (1928). *Précipitations atmosphériques, écoulement et hydroélectricité*. 366 p. 38 fig., 68 tabl. Publication de l'Institut fédéral de météorologie et de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux; fascicule 16. La Baconnière, Neuchâtel et Dunod, Paris.
- MARTEL, E. A. (1921). *Nouveau Traité des eaux souterraines*. 838 p., 384 fig. Doin, Paris.
- MAYER, A. (1947). *Les terrains perméables*. 134 p., 34 fig. Dunod, Paris.
- MEINZER, OSCAR, E. (1942). *Hydrology*. 712 p., nombreuses figures. Dover Publications Inc., New-York.
- PRINZ, E. (1923). *Handbuch der Hydrologie*, 2^e édition. 422 p., 333 fig. Springer, Berlin.
- REVOL, F. (1948). Quelques pas sur les traces de nos ancêtres cherchant à découvrir les secrets des fontaines. *La Houille Blanche*, sept.-octobre 1948, p. 398-406.
- SCHOELLER, H. (1962). *Les eaux souterraines*. 642 p., 187 fig. Masson, Paris.
- SULEIMAN, HAMED (1957). Presidential Adress. — Third Congress on Irrigation and Drainage, San-Francisco. *Transactions*, vol. I, p. 10-14.
- UNESCO (1963) *Légende internationale des cartes hydrogéologiques*. Unesco / NS / NR 20, janvier 1963.
- ZDILAR, A. (1962). *Statistique des consommations d'eau dans le monde*. L'Eau, septembre 1962 et janvier 1963. Paris.

SOMMAIRE DES SEPT FASCICULES PRÉCÉDENTS

27^{me} - 28^{me} années, 1951-1952

- D^r U. SBORGI, prof., directeur de l'Institut de chimie générale à l'Université de Milan : *Quelques aspects de l'enseignement de la chimie inorganique, basés sur le développement de la chimie depuis Mendeleïeff jusqu'à la découverte de la structure de l'atome.*
- C. SECRÉTAN, D^r ès sciences, professeur aux Gymnases cantonaux, Lausanne : *Alchimie, psychologie et pensée scientifique.*

29^{me} année, 1953

- E. GUYOT, directeur de l'Observatoire cantonal, professeur extraordinaire à la Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel (Suisse) : *La rotation de la terre et ses variations.*

30^{me} année, 1954

- E. GUYOT, anc. directeur de l'Observatoire cantonal, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel (Suisse) : *L'année géophysique internationale.*

31^{me} - 34^{me} années, 1955-1958

- H. GUIMIOT, professeur agrégé au Lycée Saint-Louis, Paris : *Essai d'une synthèse élémentaire gravitation-expansion par la mécanique classique et d'une expression théorique de la constante de Planck.*
- R. VUILLE, chef de travaux à l'Institut de chimie de l'Université de Neuchâtel : *Quelques problèmes relatifs aux couches sensibles photographiques.*

35^{me} - 36^{me} années, 1959-1960

- TH. RAVEN, professeur à l'Université de Beyrouth (Liban) : *Dérive continentale causée par courants dans le substratum.*
- E. MUHLESTEIN, D^r ès sciences, ancien professeur au Gymnase de Bienne : *Les effets « photographiques » d'un bombardement intense par des particules lourdes chargées.*

37^{me} année, 1961

- J. DE PRINS, chargé de cours à l'Université libre de Bruxelles : *Application des masers à $N^{15}H_3$ à la mesure et à la définition du temps.*

38^{me} année, 1962

- E. GUYOT, professeur à l'Université de Neuchâtel : *La figure de la Terre.*
- R. VUILLE, privat-docent de radiochimie à l'Université de Neuchâtel : *Quelques applications des radioéléments.*
- M.-M. KRAFT, Musée botanique de Lausanne : *Etat actuel de la mycologie.*
- J.-P. PORTMANN, chargé de cours à l'Université de Neuchâtel : *Louis Agassiz, pionnier de la glaciologie.*